

隔壁を有するトンネル二次覆工への高流動コンクリートの適用

ー関西電力舞鶴発電所新設工事のうち取水路トンネル工事ー

Application of Self-Compacting Concrete to the Secondary Lining of a Tunnel with a Center Wall
- Construction of the intake tunnel for the Maizuru Hydroelectric Plant, Kansai Electric Power Co., Inc. -

中村 敏昭¹⁾・栗林 棟一²⁾・髙谷 亮太³⁾・石田 良平⁴⁾

Toshiaki NAKAMURA, Toichi KURIBAYASHI, Ryota KATSURAYA, Ryohei ISHIDA

The intake tunnel has a unique cross-sectional shape, with a wall provided at the center. In addition, the amount of reinforcing bars per unit volume of concrete is larger than normal tunnels. Since a sliding form was used for casting the secondary concrete lining, self-compacting concrete was adopted to prevent defects such as voids due to insufficient compaction, and to facilitate concrete placement. Therefore, placement tests were performed in advance, to determine quality control criteria with which to rationalize the construction.

This paper covers the outline of the placement tests performed prior to the tunnel construction; methods used to determine the quality control criteria; and results obtained during the construction

Key Words: self-compacting concrete, secondary lining, quality control criteria, placement tests

1. はじめに

関西電力舞鶴発電所新設工事のうち取水路トンネルは、中央に垂直隔壁を有する特殊な形状であり、一般的なトンネル覆工に比べ鉄筋量が多いことが特徴である。この二次覆工は、スライドセントルによる施工となるため、コンクリートの充填不良、締固め不足などに起因する品質不良を避け、施工性を向上させることから、高流動コンクリートが採用されている。

一般的に高流動コンクリートは、練り混ぜ後からの経過時間や外的環境要因などの影響により品質の変動が大きく、施工管理には専門的な知識と判断が必要となる。このため、安定した品質を確保するために、事前に適用試験を実施し、実施工に用いる管理基準値を設定することで施工管理の合理化を試みた。

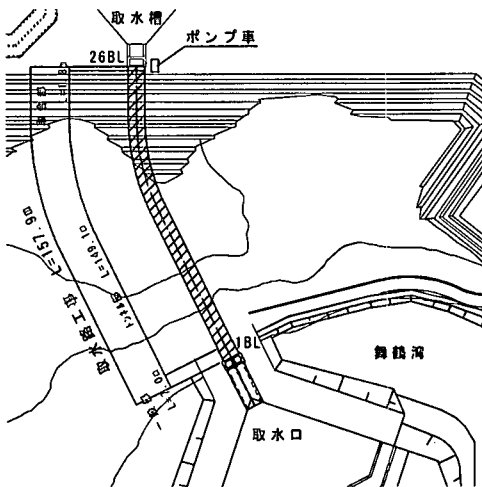
本報告は、当該トンネル工事に高流動コンクリートを適用するにあたり、事前に実施した適用試験の概要、管理基準値の設定方法および実施工での検証結果を報告するものである。

2. 施工概要

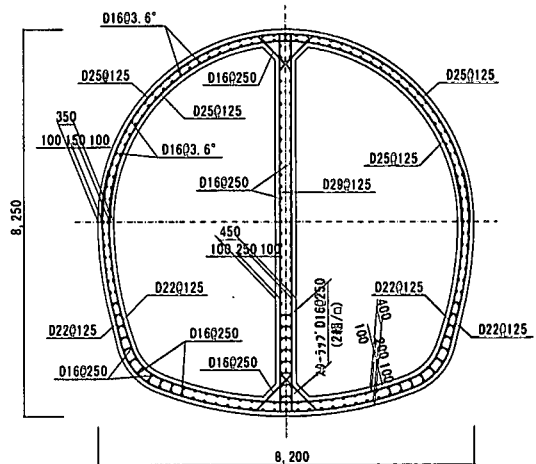
図-1にトンネル平面図、図-2に標準配筋図を示す。

-
- 1) 関西電力(株) 舞鶴火力建設所 土木工事課
 - 2) フェロー会員 (株)熊谷組 関西支社 関電舞鶴土木作業所
 - 3) 正会員 (株)熊谷組 土木本部 土木設計部
 - 4) (株)熊谷組 技術研究所

当該トンネルは、全長 157.9m（一般部：8.8m、トンネル部：149.1m）であり、1ブロック 6.0mを基本長として全 26 ブロックに分割し施工された。トンネル断面形状は外幅 8.2m、外高 8.25mの標準馬蹄形であるが、取水経路として独立した 2 系列を確保することを目的に、中央に垂直隔壁を有することが特徴である。このため、覆工厚が 35～45cmの複鉄筋断面となり、一般的なトンネル覆工に比べ、単位体積当たりの鉄筋量が約 200kg/m³と極めて密な配筋形状となっている。



図－1 トンネル平面図



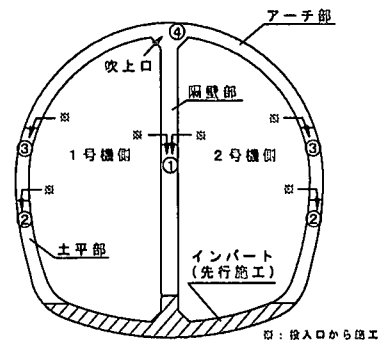
図－2 標準配筋図

図－3 に覆工コンクリートの施工順序図を示す。

二次覆工コンクリートは、インバート部を先行施工した後、スライドセメントルを使用し土平部、隔壁部およびアーチ部を施工した。図中①～③の土平部および隔壁部はスライドセメントルに設けた投入口よりコンクリートを打設し、投入口より上部は吹上口から施工した。このため④アーチ部天端付近は吹上口からの圧入施工となる。

先行施工されるインバート部はスランプ 12cm のコンクリートを採用したが、スライドセメントルによる施工部分は前述した構造的な特徴から高流動コンクリートを採用した。

なお高流動コンクリートは粉体系と増粘系に大別されるが、今回は、本発電所建設工事で施工実績がある粉体系高流動コンクリートを採用した。

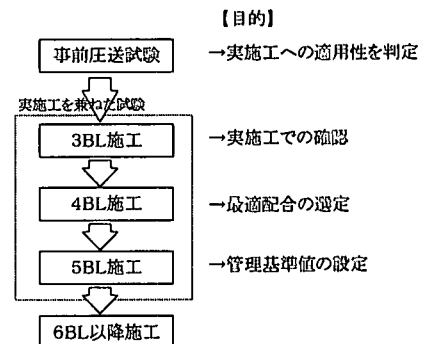


図－3 施工順序図

3. 高流動コンクリートの適用試験概要

安定した品質を確保するために、適用試験により最適配合と種々の管理基準値を設定した。

適用試験の実施手順を図－4 に示す。試験は、実施工に先立って実施した事前圧送試験と、実施工を兼ねた適用試験とに大別される。事前圧送試験において高流動コンクリートの適用性を確認した上で、実施工（3BL（ブロック）～5BL（ブロック））を兼ねて最適配合と詳細な管理基準値の設定を行った。



図－4 適用試験の実施手順

4. 事前圧送試験

(1) 試験概要

実施工に先立ち、高流動コンクリートの適用性を確認するために、事前圧送試験を実施した。

本試験には、トンネル天端部を模擬した試験槽（6.4m×1.7m×0.4m）を用いた。図－5に試験槽の概略図を示す。試験槽の寸法、配筋形状はトンネル天端部分を模擬しており、約150m（配管径φ127mm）の配管状況やトンネル天端部の吹上げ状況を再現できるように計画した。セメント妻側に相当する空気孔は、試験槽吹上口の反対位置のみに設け、途中の施工状況が確認できるように試験槽上面にアクリル製の観測窓を設けた。

試験に用いた高流動コンクリートの配合は、本発電所建設工事で施工実績のある粉体系高流動コンクリート（FC500a, 表－2 参照）を用いた。なお、以後実施した最適配合の検討に関しては、次章で詳細を示す。

試験では、高流動コンクリートの当該トンネルへの適用性を検討するために、圧送によるスランプフローロス（荷卸地点と打設地点のスランプフロー差）、試験槽内での流動性、充填状況の把握をはじめ、配管内圧力と試験槽内圧力を計測した。

打設方法は、実施工を想定して圧送速度を25m³/hで一定とし、また、段取り換えを想定し途中30分の練置き期間を設けた。

(2) 試験結果

圧送前後で22cm（66cm→44cm）のスランプフローロスが認められたが、試験槽内への流動性、充填性に問題はなく、バイブレーターなどによる補助作業、配管閉塞などの施工上の問題も発生しなかった。このため、配管内圧力と試験槽内圧力の急上昇を確認後、打設を完了し、約3時間後に型枠を脱型した。

この結果、アクリル板や圧力計設置による1cm程度の段差にまで十分にコンクリートが充填されており、実施工において地山の凹凸に十分に追従可能であると判断した。

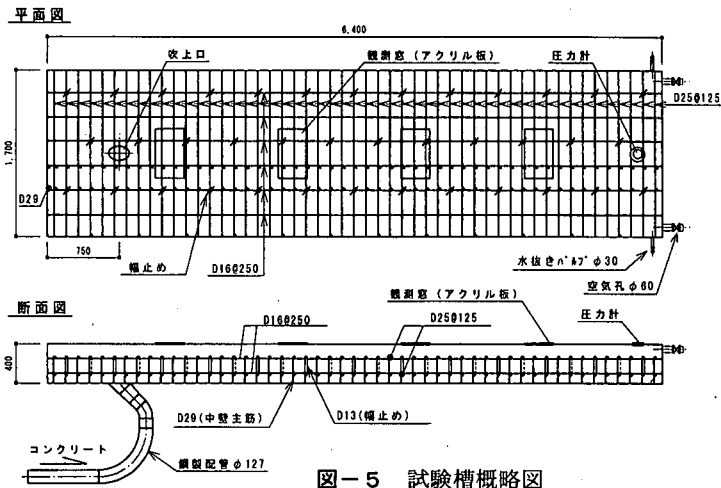
5. 実施工を兼ねた適用試験

トンネル覆工を模擬した事前圧送試験での結果を基に、実施工に即した最適配合や、より詳細な管理基準値を設定するために、実施工を兼ねた適用試験を実施した。

試験は、前章で示したように施工区間のうち3BL～5BLの3ブロックにおいて実施した。表－1に試験概要を示す。同表に示すように、まず3BLにおいて事前圧送試験と同配合の高流動コンクリートを用いて実施工への適用性を確認した。この結果から、4BLで最適配合を選定し、5BLでは、施工状況を変化させることで、実施工での管理基準値を設定した。

ここで、すべてのブロックにおいて荷卸地点と打設地点のスランプフロー試験を実施し、さらに安全管理およびコンクリート打止め管理のために配管内圧力（ポンプ車近傍と吹上り口近傍）と型枠側圧を計測した。

これらの試験より得られた結果をまとめて以下に示す。



図－5 試験槽概略図

表－1 試験概要

施工場所	変動パラメータ		備考
	配合	圧送速度	
3BL	1種類	一定※	実施工への適用性を確認
4BL	3種類	一定	最適配合を選定
5BL	決定配合	変化	管理基準値を設定

※施工状況に応じて変更

(I)最適配合の選定

粉体系高流動コンクリートの場合、粉体量(C+F)の増加に伴って必要以上に発現強度が増加する。このため、発熱量や乾燥収縮などを抑え、さらに経済性の面から粉体量を必要最低限に抑えることが重要である。

このため、今回は、事前圧送試験で用いた高流動コンクリート(FC500a)の配合を基準とし、粉体量の異なるコンクリートの施工状況を把握することで、最適な粉体量を選定した。

表-2に試験で比較検討した4種類の高流動コンクリートの配合を示す。これら高流動コンクリートの粉体量は、400、450、500kg/m³の3種類であり、スランプフロー65cm、空気量4.5%を目標に配合を設定した。試験室での試練りにおいては、いずれの配合も十分な性状を示すことが確認された。

表-3に実施工の結果を配合別にまとめて示す。また、施工時に確認された性状を以下に示す。

表-2 高流動コンクリートの配合

配合名	種類	スランプフロー cm	W/C %	空気量 Air %	単位量 kg/m ³					
					水 W	セメント C	フライアッシュ F	細骨材 S	粗骨材 G	高性能AE減水剤
FC500a	FC(F=30%)	65	33.0	3.0	165	350	150	826	875	8.00
FC500b	FC(F=30%)	65	33.0	4.5	165	350	150	906	855	5.60
FC450	FC(F=30%)	65	36.7	4.5	165	315	135	851	855	4.95
FC400	FC(F=30%)	65	40.5	4.5	162	280	120	808	855	5.50

※いずれの配合も設計基準強度は24N/mm²

(a)FC500a

圧送速度 25m³/h ではパイプレーターによる補助作業が必要であったが、圧送速度 15m³/h では、スランプフローロスは少なく、型枠内での流動性、充填性は良好であった。

(b)FC500b

荷卸地点でのスランプフローは 60～68cm、打設地点では 50～67cm でありスランプフローロスも少なく抑えられることが確認された。スランプフロー形状は、端部にまで粗骨材が運ば

れ、モルタルの先走りなどの不具合は認められなかった。このことから、FC500a と同様に流動性、材料分離抵抗性に優れた配合であると判断された。

(c)FC450

圧送速度 25m³/h の場合と段取り換えのための 40 分練置きの場合では、スランプフローロスが大きく流動勾配が大きくなる傾向が認められた。このため、流動の補助としてパイプレーターを数～数十秒使用した。

しかし、これらを除くと荷卸地点でのスランプフローは 60cm 程度、打設地点では 57～61cm でありスランプフローロスも小さく、型枠内での流動性、充填性は良好であった。

(d)FC400

荷卸地点でのスランプフローは 65cm 前後であるが、打設地点においては 56～72cm となり、圧送速度を 15m³/h としても圧送後の変動が大きくなる傾向が認められた。特に 72cm のスランプフロー形状は、フロー中央部に粗骨材が残留し周辺部ではモルタルの先走りが認められた。型枠内への充填に関しては、粗骨材が沈降し、やや材料分離気味の傾向が認められた。

表-3 高流動コンクリートの施工結果

配合	圧送速度 (m3/h)	スランプフロー(cm)		スランプ フローロス (cm)	流動性	備考(施工場所)
		荷卸 地点	打設 地点			
FC500a	25.0	62.0	43.5	18.5	△	(3BL)
		65.0	39.5	25.5	△	(3BL)
	15.0	65.0	51.0	14.0	○	(3BL)
		70.0	61.8	8.3	◎	(3BL)
FC500b	25.0	68.5	66.5	2.0	○	(5BL)
		60.8	50.0	10.8	○	(5BL)
	15.0	62.0	57.0	5.0	◎	(4BL)
		62.0	59.0	3.0	◎	(4BL)
		60.8	53.5	7.3	○	(5BL)
		25.0	59.8	43.3	16.5	△
FC450	20.0	60.3	59.8	0.5	○	(5BL)
		64.5	46.0	18.5	△	40分練置き(4BL)
	15.0	60.8	61.0	-0.3	○	(5BL)
		60.3	56.8	3.5	○	(5BL)
		64.5	56.0	8.5	▲	(4BL)
FC400	15.0	65.8	71.3	-5.5	▲	(4BL)

[凡例]◎:極めて良好 ○:良好 △:パイプレーターなどの補助作業必要 ▲材料分離傾向あり

いずれの配合においても、型枠側圧は最大で液圧相当の 30%程度であり、施工上の問題は発生しなかった。また、型枠脱型後のコンクリート表面や妻部における地山への充填状況を観察したが、顕著な不具合は発生しなかった。

以上のことから、施工性に問題がなく粉体量が少ない FC450 の使用を基本とし、吹上りからの施工部分は、不具合が生じた場合にパイプレーターの使用ができないことから、より安定した品質が得られる FC500b を採用することとした。

(2) スランプフロー・圧送速度

圧送速度を変化させた場合のスランプフローロスの計測結果を図-6に示す。図中の打設可能範囲は、前述した充填状況観察からパイプレーターなどの補助作業を必要としないスランプフローの範囲を示す。

- 同図より、以下のことがわかる。
- ① 圧送速度が遅くなるほどスランプフローロスは小さい。
 - ② 圧送速度 25m³/h ではパイプレーターによる補助作業が必要となる。
 - ③ 圧送速度 15m³~20m³/h ではすべて打設可能範囲内である。

以上のことから、6BL 以降に用いる管理基準値を以下のように設定し、施工途中での配合変更を考慮して図-7に示す品質管理フローを作成し実施に適用した。

【管理基準値】

- スランプフロー：荷卸地点 65±5cm
- 打設地点 45~70cm 程度
- ※スランプフローロス 15cm 以下を目標
- 圧送速度：15m³/h (20m³/h 以下)
- 使用配合：FC450 (土平部、隔壁部)
- FC500b (吹上りからの施工部分)

(3) 天端充填状況

吹上りに段取り換えした以降の施工では、地山まで隙間なくコンクリートが充填されているかが妻部以外目視できない。このため、コンクリートが確実に充填されたことを確認するために、電気導通センサーを設置した。

設置したセンサーは電極間の電気導通を計測し計測電圧が急激に下降することで電極設置位置までコンクリートが充填されたこと確認するもので、妻部における目視観察や配管圧力計測と合わせてコンクリート打止め管理に用いた。

図-8に 5BL での充填状況を示す。センサー

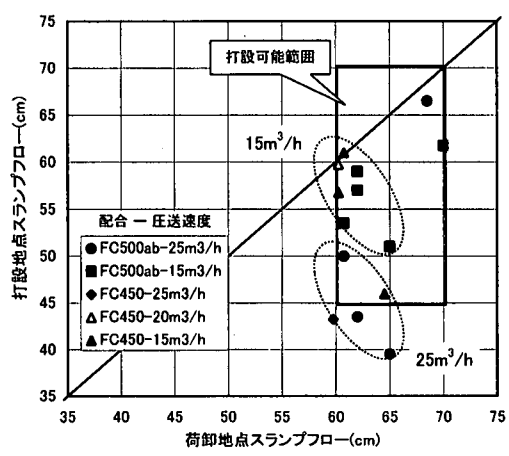


図-6 スランプフローと圧送速度

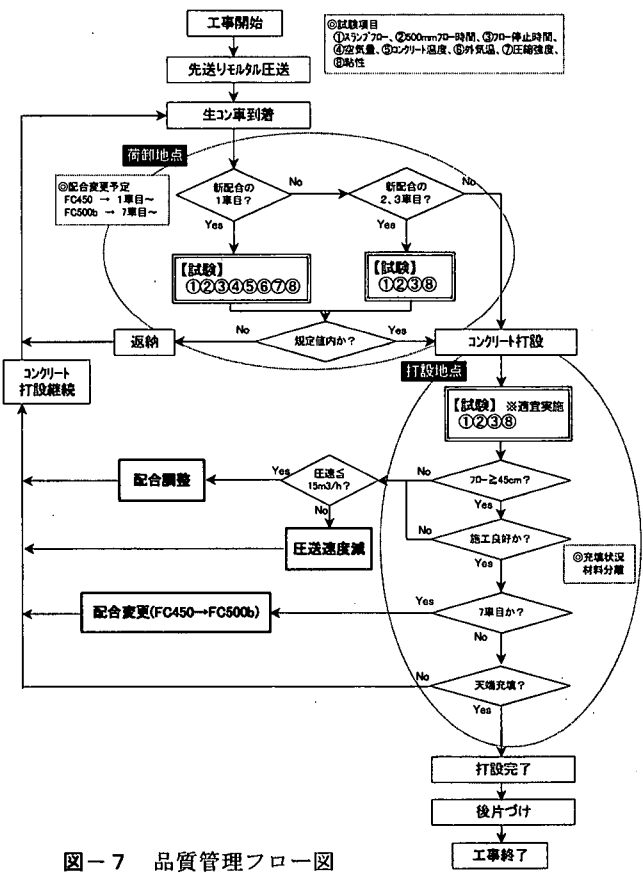
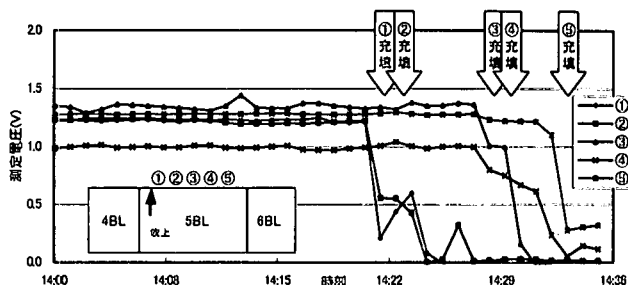


図-7 品質管理フロー図

は地山面に 1m 間隔で計 5 箇所設置したが、吹上口から順にコンクリートが地山まで充填される状況が確認できた。

使用した高流動コンクリートのブリージング試験ではブリージング率が 0.0%（計測最小値以下）であること、また完成後の電磁波レーダー調査から、堰工コンクリートと地山との間に明確な隙間が観測できなかったことから、地山の凹凸まで確実な充填ができたものとする。



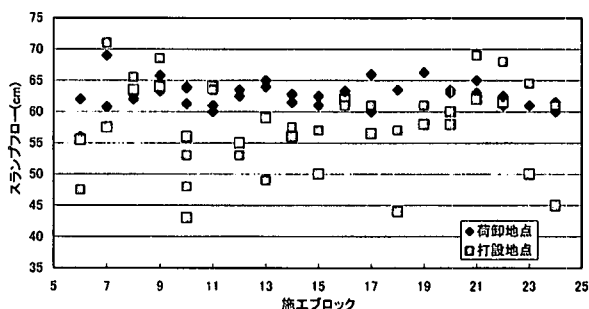
図－8 天端充填状況

6. 6BL 以降の施工状況

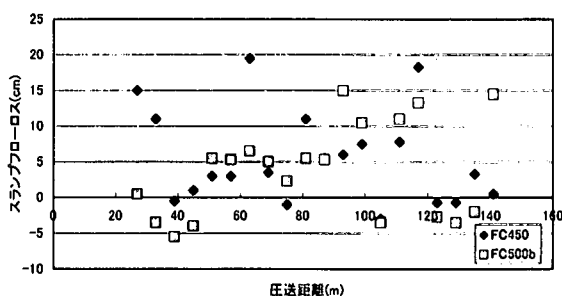
6BL 以降、図－7 に示した品質管理フローに従い施工した。また、スランブフロー試験では、粗骨材の偏在やモルタルの先走りなどスランブフロー形状の目視判断が重要であるため、スランブフロー形状チェックシートを別途作成し、実施工に役立てた。これにより、最終 26BL まで問題なく施工を完了した。

6BL 以降のスランブフロー試験結果を図－9 に示す。荷卸地点のスランブフローは管理基準値以内（ $65 \pm 5\text{cm}$ ）で安定しており、打設地点でのスランブフローも管理基準値（ $45 \sim 70\text{cm}$ ）をほぼ満足している。

図－10 に圧送距離とスランブフローロスの関係を示す。圧送速度は全ブロック $15\text{m}^3/\text{h}$ で一定であったため、圧送距離が短くなるに従ってスランブフローロスも小さくなる傾向が認められる。



図－9 スランブフロー試験結果



図－10 圧送距離とスランブフローロスの関係

7. まとめ

今回、トンネル二次堰工に高流動コンクリートを採用するにあたり、事前に適用試験を実施し、最適配合と種々の管理基準値を設定した。また、型枠脱型後は約 2 週間の散水養生期間を設けた。この結果、完成してほぼ 1 年が経過した現在もひび割れなどの顕著な施工不良は確認されていない。

以上に示した施工時の検討結果と施工後の状況から、以下のことが示される。

- ① 一般に高流動コンクリートは施工管理が煩雑となるが、スランブフロー、スランブフローロス、圧送速度などの管理基準値を設定することで、施工管理の合理化を図り、安定した品質を確保することができた。
- ② 高流動コンクリートの特長を活かすことで、品質、施工面のみならず、経済的にも有利な施工方法が選定できると考える。

〔参考文献〕

- 1) 寺田昌史・中村敏昭・村上嘉謙，粉体系高流動コンクリートによる水路トンネルの二次堰工，電力土木，2002.7